引用格式：李国杰, 孙凝晖. 探索我国信息技术体系的自立自强之路——兼序“构建自立自强的信息技术体系”专题. 中国科学院院刊, 2022, 37(1): 1-7.
Li G J, Sun N H. Preface to topic “Build and Strengthen China's Information Tech-system”. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(1): 1-7. (in Chinese)

编者按 高水平科技自立自强不是靠单项技术，而是要形成强大的国家技术体系，成为构建自立自强的信息技术体系中的重要方面。未来的信息技术产业生态将朝着领域专用、百花齐放的方向发展，中国的优势将在未来的竞争中充分体现。为了推进我国的信息技术体系建设，《中国科学院院刊》组织了“构建自立自强的信息技术体系”专题，分别从芯片、系统结构、操作系统、未来网络、信息基础设施、应用（大数据）和信息网络安全等不同角度阐述了构建自立自强信息技术体系的技术途径和可能遇到的挑战。希望专题文章能引起各方面的重视，并将共识转化成力量，力争在 15—20 年内完成构建自立自强的信息技术体系这一宏伟而艰巨的任务。本专题由《中国科学院院刊》副主编、中国工程院院士、中国科学院计算技术研究所研究员李国杰指导推进。

探索我国信息技术体系的自立自强之路

——兼序“构建自立自强的信息技术体系”专题

李国杰* 孙凝晖

1 中国科学院计算技术研究所 北京 100190

2 中国科学院大学 计算机科学与技术学院 北京 100049

摘要 高水平科技自立自强不是靠单项技术，而是要形成强大的国家技术体系，即“国家平台”。信息技术3.0（IT3.0）时代一定会产生不同于IT 1.0和IT 2.0时代的新技术体系，这是中国构建自立自强信息技术体系的难得机遇。未来的信息技术产业生态将朝着领域专用、百花齐放的方向发展，中国的优势将在未来的竞争中充分体现。构建信息技术体系应重视5个原则：（1）正确处理自立自强与开放合作的辩证统一关系；（2）以系统结构创新为主，重在跨层纵向整合；（3）发展开源生态，构建技术命运共同体；（4）重点发展领域专用产业生态；（5）大力发展敏捷设计和敏捷制造。文章还简要介绍了《中国科学院院刊》“构建自立自强的信息技术体系”专题的8篇文章，这些文章侧重于技术方向和科研模式的选择，一定程度上反映了我国科技人员探索建立信息技术新体系的努力踪迹和期望的愿景。

关键词 信息技术体系，高水平自立自强，技术命运共同体，跨层纵向整合，开源生态，敏捷设计，敏捷制造

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20211117001

*通信作者

资助项目：中国科学院战略研究与决策支持系统建设专项（GHJ-ZLZX-2021-06）

收稿日期：2021年12月16日

1 高水平科技自立自强的含义

2021年1月，习近平总书记在省部级主要领导干部学习贯彻党的十九届五中全会精神专题研讨班的报告中强调，“构建新发展格局最本质的特征是实现高水平的自立自强”。2021年5月28日，习近平总书记在中国科学院第二十次院士大会、中国工程院第十五次院士大会、中国科协第十次全国代表大会上发出号召：“加快建设科技强国，实现高水平科技自立自强”。党中央对科技自立自强进一步提出了“高水平”的要求，这是对广大科技人员的激励和鞭策。为实现这个目标，我们首先要理解什么是“高水平科技自立自强”。

新中国从1949年成立开始就一直坚持“独立自主，奋发图强”的发展方针。新中国成立初期，百废待兴，中国人民志愿军就敢于走出国门与世界上头号强敌拼杀；在美国、苏联等大国都封锁、打压我国的极端困难时期，我们咬紧牙关研制出自己的“两弹一星”。那是一种主要靠自力更生精神激励的自立自强。经过70多年的艰苦努力，中华民族已经从站起来、富起来向强起来的目标奋进。当今世界正在经历百年未有之大变局，到新中国成立100年时，中国将成为社会主义现代化强国。“高水平科技自立自强”就是现代化强国的自立自强，是以掌握当代高科技为基础，自立于世界民族之林的自立自强。

具体而言，“高水平科技自立自强”至少应达到4项目标：① 科技发展摆脱模仿、跟踪的技术路线，在信息、生命、材料、制造、航天等领域进入世界科技第一梯队，在若干重要的科研方向上起到引领作用；② 在涉及国防和信息网络安全的科技领域掌握非对称的“撒手锏”技术，具备确保国家安全的自卫能力；③ 在高技术和高端产业领域具有平起平坐的竞争能力，在全世界的技术共同体中取得充分话语权；④ 在信息技术（IT）、制造等领域形成自主、开放的技术体系，使技术创新链和产业供应链的安全性得到可靠保证。

2 信息技术领域自立自强的标志是开放可控的技术体系

信息领域市场巨大，技术竞争激烈，几十年来已形成“赢者通吃”的格局，比传统产业更具垄断性和技术排他性。决定市场胜负的主要因素不是单项技术，而是有优势的信息技术体系。所谓信息技术体系是指用一系列技术标准和知识产权将器件、部件、整机、系统软件、中间件、应用软件密切联系在一起的技术整体。个人计算机（PC）和智能手机都已形成信息技术体系，5G通信正在逐步形成信息技术体系。人们常常把信息技术体系比喻成一棵根深叶茂的参天大树，中央处理器（CPU）等器件是“树根”，操作系统等系统软件是“树干”，中间件等软件开发环境和工具是“树枝”，各类应用软件是“树叶”，各个应用领域的产品和服务是“果实”。信息技术体系是在自然规律和社会因素共同作用下形成的，需要经济基础、文化基础、社会价值观念等各种条件的配合，并受到国家和地区具体条件的制约。信息技术体系加上与之关联的经济社会环境就构成信息产业生态系统。

高水平科技自立自强不是靠单项技术，而是要形成强大的国家技术体系，即“国家平台”。信息领域各个企业之间的竞争不是个别产品之争，而是产业生态系统（信息技术平台）之争。在计算机行业中，主流技术已建立在英特尔（Intel）公司的CPU和微软公司的操作系统（Windows OS）基础上，Windows OS与英特尔微处理器的指令集架构（Intel ISA）的组合已成为事实上的工业标准；在移动通信行业中，英国Acorn公司的芯片（ARM）与安卓操作系统（Andriod）的组合，以及苹果公司手机与操作系统（iOS）已成为主流生态系统。决定信息技术企业竞争地位的关键是谁掌握了基础技术平台，不能自主的信息技术体系必然受制于人。我国信息技术产业的痛处

就是在现有的产业生态环境中缺少发言权（定价权和发展方向的决定权）。如何在与国外龙头企业的竞争中发展培育有较大技术发言权的新产业生态，如何在融入国际主流的过程中改变“跟随者”的地位，扩大创新空间，并逐步形成开放可控的技术体系，这是信息领域实现自立自强的关键。

3 构建自立自强信息技术体系的历史机遇

纵观信息技术领域技术体系演进的历史，可以发现一个规律：一旦一个技术体系占据了主导权，后发者就很难在同一赛道实现赶超或取代，而原赛道的领先者也很难在新“蓝海”延续其成功。几十年来，不少企业试图将微软和谷歌拉下PC和手机生态的霸主位置，但都未成功，微软进军手机领域的种种努力也均宣告失败。历史告诉我们：形成新的技术体系必须把握住新应用出现时的宝贵机遇。

信息技术领域有一个不同于其他领域的重要特点：新市场远远大于旧市场。全球个人计算机1993年达到1亿台，互联网设备2005年达到10亿个，移动互联网设备2016年达到100亿个，预计要不了多久物联网设备会超过1 000亿个。信息技术领域的权威学者Gordon Bell将这一规律总结为：“计算设备约每10年左右完成1次升级换代，设备数和用户数均增加至少1个数量级”，这被业界称为“贝尔定律”。贝尔定律使计算机领域的技术体系换代成为可能。人类已经走过以桌面应用为主的IT 1.0时代和以移动端应用为主的IT 2.0时代，未来的IT 3.0时代一定会产生不同于IT 1.0和IT 2.0时代的新技术体系，这是中国构建自立自强信息技术体系的难得机遇。

随着互联网向人类社会和物理世界渗透延伸，万物互联、“人机物”融合、泛在计算的IT 3.0时代正在开启[1]。IT 3.0时代的新特征是以“物”为核心，物端设备将出现爆炸式增长，越来越多的“物”，包括传感器、家电、车辆、工业制造设备将加入到原有的人机二元互联的信息空间，网上负载和信息交互需求也会出现新的变化。高品质用户“可测、可调、可控、可信”的新服务要求将成为刚需；实时控制、高吞吐率、高良率、自适应性和个性化将成为新技术体系的突出特点。原来的技术体系不能满足这些新需求，强劲的新需求必将促使新的技术体系应运而生。

由于基础薄弱和国际环境制约，在过去的半个多世纪里，中国一直只能做信息技术的追随者，错过了引领建立信息技术体系的机遇。但通过几十年的努力，中国已在信息技术领域打下较坚实的基础：信息技术领域整体技术和产业水平已居世界前列；工程师人数世界第一；专利申请数量世界第一；在全球前10家市值最大的信息通信技术（ICT）企业中，中国占据3个席位（华为、阿里巴巴、腾讯）。中国的另一个特点是市场大，2020年我国数字经济规模达到39.2万亿元。市场大意味着创新场景多，一个细分领域的未来市场就能形成足够大的产业生态。人才多意味着有足够多的研发和工程队伍应对多个细分领域的技术体系建设。“摩尔定律”（Moore’s Law）①已接近尾声，一种产品“通吃天下”的格局即将结束，未来的信息产业生态将朝着领域专用、百花齐放的方向发展，中国的优势将在未来的竞争中充分体现。

4 构建信息技术体系应重视的5个原则

在构建和培育信息技术体系的过程中，需要重视5个原则性问题。

（1）自主与开放“双轮”驱动。发展与安全是一体之两翼，需要“双轮”驱动。走好科技自立自

① 英特尔创始人之一戈登·摩尔的经验之谈，其核心内容为：单位面积的集成电路上可以容纳的晶体管数目大约每经过18个月便会增加1倍。

强之路，必须正确处理自立自强与开放合作的辩证统一关系。我们不但要重视自主研究开发，真正掌握信息领域的核心关键技术，而且要以更加开放的思维和举措推进国际科技交流合作，积极融入全球创新网络，使我国成为全球科技开放合作的广阔舞台。“不拒众流，方为江海”，在发展自立自强的信息技术体系中要抵制“为渊驱鱼，为丛驱雀”的关门主义倾向。

（2）以系统结构创新为主，重在跨层纵向整合。 通观计算机发展的历史，体系结构和芯片的进步各自为计算机性能的提升作出了一半左右的贡献。但随着“登纳德缩放比例定律”（Dennard Scaling）②的失效和“摩尔定律”的放缓，芯片很难再继续作出一半的贡献。在变革性的新器件大规模进入市场以前，提高计算机性能和能效的希望主要寄托在体系结构的创新上。体系结构研究有纵横交替、周期性发展的规律。过去 30 年的重点是 CPU 芯片、存储系统、操作系统、编译系统等各个层次的横向独立研究，今后需要透彻了解各个层面技术的联系和制约，从上到下实现整体的改进和优化。重点发展各个领域的跨层垂直优化技术，用适应不同场景的加速芯片和系统战胜曾经是主流的通用芯片。

（3）发展开源生态，构建技术命运共同体。 目前，世界上高达 99% 的软件使用开源组件，开源模式也已扩展到硬件领域。开源生态的快速崛起，为包括中国在内的广大发展中国家突破技术垄断和市场垄断带来新机遇。开源是以弱胜强、打破技术垄断的有效进攻方式，也是我国构建自立自强信息技术体系的重要途径。长期以来，我国对开源社区的贡献与科技大国的地位并不相称，今后要采取“参与融入、蓄势引领”的策略，鼓励企业“参与融入”国际成熟的开源社区，争取话语权；汇聚国内软硬件资源和开源人才，打造自主开源生态，伺机实现引领发展，构建“人类技术命运共同体”。

（4）以多打少，重点发展领域专用产业生态。 半导体产业存在通用-专用（定制化-标准化）交替主导发展的“牧本周期”③，被业界称为“半导体产业之摆”。今后十几年，特定领域系统结构（DSA）将成为计算机发展的主流。目前十分火热的人工智能（AI）芯片、自动驾驶芯片等都属于 DSA 范畴。DSA 的目标是通过抽取软件的行为来发现不能被当前架构有效加速支持的部分，并进行新的专用架构设计从而提高系统性能。图灵奖获得者 Hennessy 和 Patterson[2]认为，DSA 将开启计算机体系结构新的黄金时代。中国市场广阔、开发人员多，发展 DSA 具有天然优势。我们要充分利用这一优势，以多打少，通过发展领域专用芯片和系统，打造具有中国特色的信息技术体系。

（5）以快打慢，大力发展敏捷设计和敏捷制造。 芯片设计代价很高，具有设计周期长、专业门槛高的特点。智能万物互联时代在芯片需求多和芯片设计代价高之间产生了尖锐的矛盾。敏捷设计是应对碎片化应用场景的最有效方式。芯片的设计与制造过程需要使用各种工具，包括微架构设计空间优化工具、测试与验证工具，电子设计自动化（EDA）工具、芯粒的硅基集成工具和芯片异质集成工具等。只有这些工具能够免费并十分方便地获得，才能大幅度降低芯片设计和制造的门槛，充分发挥中国的人才红利。以快打慢，大力发展敏捷设计和敏捷制造是加速构建我国自立自强信息技术体系的“奇招”。

② 该定律指出，随着晶体管密度的增加，每个晶体管的功耗会下降，因此每平方毫米硅的功耗几乎是恒定的。由于硅的计算能力随着每一代新技术的发展而提高，计算机将变得更加节能。“登纳德缩放比例定律”在 2007 年开始显著放缓，到 2012 年几乎终止。

③ 即半导体产业定制化和标准化每 10 年周期性轮换一次。20 世纪 80 年代末，日本科学家牧本次夫发现了该特性，被英国《电子学周刊》称为“牧本浪潮”，也被业界称为“牧本周期”。

5 构建信息技术体系的若干探索与建议

为了推进我国的信息技术体系建设，《中国科学院院刊》组织了“构建自立自强的信息技术体系”专题（2022 年第 1 期）。该专题共 8 篇文章，侧重于讨论技术方向和科研模式的选择，分别从芯片、系统结构、操作系统、未来网络、信息基础设施、应用（大数据）和信息网络安全等不同角度阐述了构建自立自强信息技术体系的技术途径和可能遇到的挑战。文章的作者都是科研一线的领军人物，一定程度上反映了我国科技人员探索建立信息技术新体系的努力踪迹和期望愿景，他们的观点和看法有重要的参考价值，值得一读。建立信息技术体系还涉及战略规划、政策导向、项目设置、专利布局、技术转移、人才培养等诸多方面，本专题由于篇幅限制未能一一讨论这些重大问题。

本专题 8 篇文章涵盖 5 个方面内容：

（1）*技术体系方面*。孙凝晖院士等的文章《对信息技术新体系的思考》分析了信息技术新体系的需求，重点阐述了中国主导、全球共建的贯通式跨层优化新体系（C 体系）的 5 项基本原则：内置安全机制、开放跨层优化、多态场景加速、高并发实时处理与传输、敏捷开发方法与开源生态。这些原则的共同理念都是充分利用中国特色，发挥中国优势。

（2）*芯片设计方面*。陈云霁等“寒武纪”科研团队成员提出用芯片学习（chip learning）取代芯片设计，目标是通过学习使得芯片设计完全不需要专业知识和设计经验，可以在短时间、无人参与的情况下高效完成。这可能是解决芯片需求多和芯片设计代价高这一尖锐矛盾的出路之一。包云岗等从另一个角度提出解决上述矛盾的出路：打造开源芯片生态的技术体系。他们以开源指令集 RISC-V 为例，清楚地勾画了发展开源芯片生态的难得机遇，也分析了开源芯片面临的巨大的挑战。

（3）*操作系统方面*。梅宏院士等在全面回顾操作系统发展史的基础上，面向人机物融合泛在计算场景，提出要“沉淀”一类新型操作系统——“泛在操作系统”，并支持新型泛在计算资源的管理调度和泛在应用的开发运行。文章分析了泛在操作系统的机遇与挑战，并对中国发展操作系统的整体部署提出了若干建议。

（4）*网络方面*。刘韵洁院士等在《关于未来网络技术体系创新的思考》一文中指出，融合、开放、智能、可定制、网算存一体已经成为未来网络技术发展的关键趋势，只有改变传统互联网架构，引入新一代信息技术进行基础网络架构创新，才能在互联网竞赛的“下半场”取得技术领先。通过对未来网络实验实施（CENI）和全球首个大网级网络操作系统“司络”（CNOS）的介绍，阐述了如何建立具有国际影响的网络技术体系的思路和建议。徐志伟等介绍了中国科学院计算技术研究所正在研究和推广的一种新型信息基础设施——高通量低熵算力网（简称“信息高铁”），并阐述了其基础性需求、关键科学技术问题和系统结构。这种新的信息基础设施不仅具有高铁交通系统一样准时可控的特点，而且具有较强的自适应性，可满足不同用户的高品质服务需求。方滨兴院士等从“人、财、物”视角出发，提出了提升网络空间安全态势的新思路，包括：通过安全能力认证解决网络安全人才供应不足问题；通过网络安全保险解决残余风险的转移问题；通过“外打内”模式的网络靶场提升信息技术产品及网络安全产品的抗攻击能力等。

（5）*大数据方面*。针对当前数据泛滥与缺失并存、数据不完备和数据安全缺失等挑战。程学旗等提出了大数据分析处理技术体系未来的发展目标与规划，旨在突破大数据分析处理的理论、技术和系统，以实现大数据分析系统的新架构、新模式、新范式和安全可信。

构建自立自强的信息技术新体系既要满足解决当前“卡脖子”问题的紧迫需求，又要为实现现代化强国的长远目标奠定基础，需要科技界、产业界和政府各部门的共同努力。希望《中国科学院院刊》“构建自立自强的信息技术体系”专题文章能引起各方面的重视，将共识转化成力量，力争在15—20年内完成这一宏伟而艰巨的任务。

参考文献

1 中国科学院信息领域战略研究组. 中国至2050年信息科技发展路线图. 北京: 科学出版社, 2009.
Li G. Information Science & Technology in China: A Roadmap to 2050. Berlin: Springer, 2011.

2 Hennessy J L, Patterson D A. A new golden age for computer architecture. Communications of the ACM, 2019, 62(2): 48-60.

Preface to Topic “Build and Strengthen China’s Information Tech-system”

LI Guojie* SUN Ninghui

(1 Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2 School of Computer Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Self-reliance and self-strengthening at high level does not depend on a single technique, but on the formation of an advantageous national tech-system, so called “country-as-a-platform”. Information tech-system refers to the whole one that closely connects devices, components, complete machine, system software, middleware, and application software with a series of technical standards and intellectual property rights. We are entering the IT 3.0 era characterized by integration of human-cyber-physical world. The IT 3.0 era will certainly produce a new tech-system different from the IT 1.0 and IT 2.0 eras, which is a rare opportunity for China to build a self-reliance and self-strengthening tech-system. In the future, the information industry ecology will develop in the direction of domain-specific oriented and China’s advantages will be fully reflected in the future competition. The following principles should be paid attention to in the construction of information tech-system: (1) correctly deal with the dialectical and unified relationship between self-reliance and open cooperation. We should actively integrate into the global innovation network and make China a broad stage for global scientific and technological opening and cooperation. (2) Before revolutionary devices enter the market on a large scale, the hope of improving computer performance and energy efficiency mainly lies in the innovation of architecture. We should focus on the development of cross layer vertical optimization technology in various fields, and defeat the once mainstream general-purpose chips with acceleration chips and systems suitable for different scenarios. (3) Develop open source ecology and build a community of technological destiny. Open source is not only an effective way to win the strong with the weak and break the technology monopoly, but also an important way to build a self-reliance and self-strengthening tech-system in China. (4) Mainly develop domain specific industrial ecology. The information field has an important characteristic different from other fields: the new market is much larger than the old market. Large market means many innovation scenarios, and the future market of a subdivided field can form a large enough industrial ecology. Another feature of China is that there are many developers, we therefore have the natural advantage in development of domain-specific architecture (DSA). (5) Vigorously develop agile design and agile manufacturing. The cost of chip design is very high, which cause high professional threshold. In the era of ubiquitous interconnection, there is a sharp contradiction between the high demand for chips and the high cost of chip design. Agile design is the most effective way to deal with fragmented application scenarios. This paper briefly introduces eight articles on this special issue of “Build and Strengthen China’s Information Tech-system”. These articles focus on the choice of future technology direction and scientific research mode, which to a certain extent reflects the efforts and expectations of Chinese scientific and technological researchers to explore and establish a new information tech- system.

Keywords information tech-systems, self-reliance and self-strengthening at high level, community of technological destiny, cross layer vertical integration, open source ecology, agile design, agile manufacturing

*Corresponding author



李国杰　中国工程院院士，发展中国家科学院院士。中国科学院计算技术研究所首席科学家、研究员，中国科学院科技战略咨询研究院特聘研究员。《中国科学院院刊》副主编。曾任中国科学院计算技术研究所所长。主要从事并行算法、高性能计算机、未来网络、人工智能、大数据和技术发展战略等领域的研究，发表学术论文150余篇，出版《创新求索录》等个人文集。主持研制“曙光-1000”等计算机，获国家科技进步奖一等奖等奖励。E-mail: lig@ict.ac.cn

LI Guojie　Academician of Chinese Academy of Engineering, Fellow of the World Academy of Sciences for the advancement of science in developing countries (TWAS). Chief Scientist of the Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences (CAS), and Distinguished Researcher of Institutes of Science and Development, CAS. He serves as Associate Editor-in-Chief of *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*. He has served as Director of the Institute of Computing Technology, CAS. He mainly engages in researches on parallel algorithm, high performance computer, future network, artificial intelligence, big data and technology develop strategy. He has published more than 150 academic papers, directed a series of projects such as building Dawning-1000 computer, and won the first prize of National Science and Technology Progress Award. E-mail: lig@ict.ac.cn



孙凝晖　中国工程院院士，中国科学院计算技术研究所学术所长、研究员、博士生导师，计算机体系结构国家重点实验室主任，中国科学院大学计算机科学与技术学院院长。《计算机学报》主编，《中国科学院院刊》编委，中国科学院信息科技领域发展路线图战略研究专家组组长。主要研究领域包括高性能计算、计算机体系结构。E-mail: snh@ict.ac.cn

SUN Ninghui　Academician of Chinese Academy of Engineering. He is the Scientific Director of Institute of Computing Technology (ICT), Chinese Academy of Sciences (CAS). He is also the Director of State Key Laboratory of Computer Architecture. He serves as Editor-in-Chief of *Chinese Journal of Computers*, and Editor of *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*. He is the leader of the expert group on strategic studies of information technology development roadmap in CAS. His main research interests include high performance computing and computer architecture. E-mail: snh@ict.ac.cn

■责任编辑：文彦杰